

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO
INSTITUTO SERZEDELLO CORRÊA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
CENTRO DE FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS EM
TRANSPORTES

DIRETRIZES PARA AUDITORIA EM PROJETOS DE OBRAS
DE CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS

MARCOS HIRAICI HASHI

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUDITORIA DE
OBRAS PÚBLICAS RODOVIÁRIAS

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2018

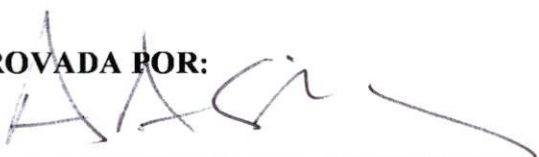
**TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO
INSTITUTO SERZEDELLO CORRÊA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
CENTRO DE FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS EM
TRANSPORTES**

**DIRETRIZES PARA AUDITORIA EM PROJETOS DE OBRAS
DE CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS**

MARCOS HIRAICI HASHI

**MONOGRAFIA SUBMETIDA AO INSTITUTO SERZEDELLO CORRÊA DO
TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO E AO CENTRO DE FORMAÇÃO DE
RECURSOS HUMANOS EM TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ESPECIALISTA EM AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS RODOVIÁRIAS**

APROVADA POR:



**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**



**JOÃO RICARDO PEREIRA, MSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**ALEXANDRE GIL BATISTA MEDEIROS, MSc (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 15 DE MARÇO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

HASHI, MARCOS HIRAICI

Diretrizes para auditoria em projetos de obras de construção de túneis rodoviários

Brasília, 2018

xii, 48p., 210 x 297 mm (ISC/TCU, CEFTRU/UnB, Especialista, Auditoria de Obras Públicas Rodoviárias, 2018)

Monografia de Especialização – Tribunal de Contas da União. Instituto Serzedello Corrêa. Universidade de Brasília. Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes.

1. Túneis Rodoviários

2. Projeto de obras

3. Auditoria

I. ISC/TCU

II. CEFTRU/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

HASHI, MARCOS H. (2018). Diretrizes para auditoria em projetos de obras de construção de túneis rodoviários. Monografia de Especialização, Instituto Serzedello Corrêa, Tribunal de Contas da União, Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 48p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marcos Hiraici Hashi

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Diretrizes para auditoria em projetos de obras de construção de túneis rodoviários

GRAU / ANO: Especialista em auditoria de obras públicas rodoviárias / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marcos Hiraici Hashi

Marcos Hiraici Hashi

SQN 408 Bloco L

70.856-120 - Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me dar saúde e perseverança para o meu trabalho. Agradeço também à minha esposa Paula Maria pelo apoio incondicional, por ter me ajudado na análise e pela paciência. Agradeço aos meus pais, Luiz e Bebers, por terem me passado valores de perseverança. Agradeço ao meu orientador, professor André Assis, por servir de inspiração e sempre estar à disposição para me ajudar, dando ideias e fazendo questionamentos.

RESUMO

O presente trabalho se justifica pela utilidade e importância das obras de túneis e pela necessidade de que tais obras sejam executadas com base em um projeto bem elaborado. O tema construção de túneis apresenta grande relevância, pois esses empreendimentos viabilizam o transporte por via subterrânea, contornam obstáculos, reduzem as distâncias dos deslocamentos e propiciam à população melhores condições de segurança, conforto e agilidade. No âmbito do Tribunal de Contas da União, não existe uma metodologia estruturada para a realização de fiscalização em projetos de construção de túneis rodoviários. Assim, diante da escassez de documentos relacionados ao assunto, buscou-se apresentar um trabalho com potencial de embasar a produção de futuras especificações sobre o tema de auditoria em projetos de túneis. A divisão do trabalho se deu em duas partes: aspectos teóricos e diretrizes. Na primeira parte, procurou-se explicitar os pontos primordiais na elaboração de um projeto de túnel rodoviário. Foram apresentados os aspectos teóricos: investigações e avaliações do maciço, modelos de projeto estrutural de túneis, tipos de suportes e, por fim, monitoramento e instrumentação. Já na apresentação das diretrizes, buscou-se elencar aspectos que podem ser objeto de verificação mais objetiva durante as fiscalizações. Em suma, elementos mínimos que devem estar presentes em um projeto de túnel bem elaborado. Assim, o presente trabalho tem como principal objetivo apresentar ferramentas para facilitar as fiscalizações de projetos de obras de túneis rodoviários.

Palavras-chave: Túneis rodoviários, projeto de obras, auditoria.

ABSTRACT

The present work is justified by the usefulness and importance of the construction of tunnels and the necessity that such constructions are executed based on a well elaborated project. The construction of tunnels is of great importance because these projects enable underground transportation, overcome obstacles, reduce distances and provide the population with better conditions of safety, comfort and agility. In the scope of Tribunal de Contas da União, there is no structured methodology to carry out supervision in projects of construction of road tunnels. Thus, due to the shortage of documents related to the subject, we sought to present a paper with the potential to base the production of future specifications on the audit theme in tunnel projects. The division of labor took place in two parts: theoretical aspects and guidelines. In the first part, it was tried to explain the primordial points in the elaboration of a project of road tunnel. Theoretical aspects were studied: mass surveys and evaluations, structural design of tunnels, types of supports and, finally, monitoring and instrumentation. Already in the presentation of the guidelines, it was sought to list aspects that can be object of more objective verification during the inspections. In short, minimal elements that must be present in a well-designed tunnel project. Thus, the main objective of this work is to present tools to facilitate the audit of road tunnel works projects.

Key-words: Road tunnels, projects, audit.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	APRESENTAÇÃO	1
1.1.1	Importância das obras de túneis	1
1.1.2	Importância dos projetos de obras	1
1.2	PROBLEMA	2
1.3	JUSTIFICATIVA	2
1.4	OBJETIVOS	4
1.5	METODOLOGIA	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	RESUMO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE UM PROJETO DE TÚNEL	5
2.2	INVESTIGAÇÕES E AVALIAÇÕES DO MACIÇO	8
2.2.1	Dados geológicos e parâmetros do maciço	8
2.2.2	Reconhecimento preliminar	9
2.2.3	Prospecção de campo	10
2.2.4	Ensaaios	12
2.2.5	Túneis em rocha	13
2.2.6	Túneis em solo	14
2.2.7	Restrições geotécnicas	15
2.3	MODELOS DE PROJETO ESTRUTURAL DE TÚNEIS	15
2.3.1	Abordagem empírica	17
2.3.2	Classificações Geomecânicas	18
2.3.3	Modelo de projeto alternativo	20
2.3.4	Modelo de anel e placa	20
2.3.5	Modelo de anel e mola	21
2.3.6	Métodos numéricos	21

2.3.7	Método observacional	22
2.4	SUPORTES	22
2.4.1	Melhoramentos e reforços do maciço	22
2.4.2	Suportes primários	23
2.4.3	Suportes secundários	24
2.5	MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO	25
2.5.1	Métodos de monitoramento	27
2.5.2	Interpretação dos resultados do monitoramento <i>in situ</i>	28
3	DIRETRIZES PARA AUDITORIA EM PROJETOS DE CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS	30
3.1	ESTUDOS PRELIMINARES	30
3.2	PROJETO BÁSICO	31
3.2.1	Projeto Geométrico	32
3.2.2	Topografia e Cadastro de Interferências	33
3.2.3	Projeto das Praças do Emboque e do Desemboque	33
3.2.4	Projeto dos Emboques dos Túneis	34
3.2.5	Estudos geológicos e geotécnicos	34
3.2.6	Sondagens	35
3.2.7	Fatores Condicionantes	36
3.3	PROJETO DO TÚNEL	37
3.3.1	Método construtivo de escavação	37
3.3.2	Seções transversais	37
3.3.3	Ações sobre o suporte	38
3.3.4	Métodos de dimensionamento de suportes	39
3.3.4.1	Métodos empíricos	39
3.3.4.2	Método observacional	42
3.3.4.3	Recomendações da ITA para o detalhamento estrutural do suporte	43

3.3.4.4	Métodos Racionais	44
3.3.5	Qualidade construtiva dos suportes	44
3.3.6	Cronograma físico-financeiro	45
3.3.7	Monitoramento e instrumentação	45
3.3.8	Estudos hidrogeológicos	47
4	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escavação e suporte para túneis com 10 m de largura	38
Tabela 2 – Classificação e suporte para túneis	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fluxo de um projeto de túnel	7
Figura 2 – Seleção dos tipos de suporte para túneis	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
Dnit	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ITA	<i>International Tunnelling and Underground Space Association</i>
TCU	Tribunal de Contas da União
USNC/TT	<i>United States National Committee on Tunnelling Technology</i>
WG 7	<i>Working Group 7</i> (Grupo de trabalho n. 7 da ITA)

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

1.1.1 Importância das obras de túneis

A maioria das obras subterrâneas surgiram a partir da impossibilidade prática de se construir na superfície ou da necessidade de transpor obstáculos (naturais ou construídos). A crescente importância do transporte de passageiros e de mercadorias, além da necessidade do melhor aproveitamento do espaço superficial, provocou o aumento na demanda pela construção de túneis. Entre os benefícios trazidos pelas obras subterrâneas, podem-se elencar:

- Economia de tempo;
- Economia de energia;
- Aumento na confiabilidade (segurança, conforto e pontualidade);
- Redução de impactos ambientais;
- Priorização de uso do espaço de superfície;
- Melhoria na qualidade de vida das cidades e valorização da região; e
- Liberação dos espaços na superfície, que apresentam custo mais elevado, para utilização por setores considerados mais nobres como lazer, moradia e trabalho.

Entre as principais aplicações das obras subterrâneas, citam-se:

- Túneis de Transporte (rodoviário, ferroviário, hidrovíário, pedestres, etc.)
- Túneis de Adução (água, esgoto, gás, cabos elétricos, telefonia, etc.)
- Cavernas (armazenamento de água, petróleo, estacionamento, enchentes, resíduos, etc.)

1.1.2 Importância dos projetos de obras

Considerando a necessidade e a utilidade das obras de túneis descrita no tópico anterior, deve-se destacar também a importância de que tais empreendimentos sejam executados com segurança, qualidade, otimização de gastos e tempo adequado de execução. Para que tais

requisitos sejam alcançados, torna-se essencial a elaboração de um projeto completo e de qualidade.

A partir de um projeto básico bem elaborado, evitam-se falhas tanto na licitação, quanto na execução da obra, permitindo à Administração Pública o atingimento da economicidade (eficiência, eficácia e efetividade).

O Tribunal de Contas da União - TCU recorrentemente trata da importância da qualidade na elaboração de projetos de obras. Nesse sentido, ressalta-se que o tema inclusive já foi objeto de súmula por parte da Corte – Súmula TCU 261 (2010), transcrita a seguir:

Em licitações de obras e serviços de engenharia, é necessária a elaboração de projeto básico adequado e atualizado, assim considerado aquele aprovado com todos os elementos descritos no art. 6º, inciso IX, da Lei 8.666, de 21 de junho de 1993, constituindo prática ilegal a revisão de projeto básico ou a elaboração de projeto executivo que transfigurem o objeto originalmente contratado em outro de natureza e propósito diversos.

1.2 PROBLEMA

Existem normas de auditoria, estabelecidas no âmbito do Tribunal de Contas da União, que possibilitem a execução de fiscalização em projetos de obras de túneis de maneira objetiva e estruturada? Quais são os principais aspectos a serem analisados em uma auditoria de projeto de construção de um túnel?

1.3 JUSTIFICATIVA

A execução estruturada das auditorias em projetos de obras de túneis está alinhada com os objetivos estratégicos do TCU, pois aumenta a capacidade de resposta do Tribunal às demandas da sociedade, e relaciona-se ao comprometimento dos servidores com a cultura de excelência nos trabalhos desenvolvidos.

Verifica-se assim, o alinhamento do tema com a missão contida no Plano Estratégico do TCU - PET 2015-2021, qual seja: “Aprimorar a Administração Pública em benefício da sociedade

por meio do controle externo”. Ademais, permitirá o aperfeiçoamento das fiscalizações e a maior tempestividade da atuação do TCU nas auditorias relativas ao assunto.

No contexto geral, o tema de construção de túneis tem grande importância, uma vez que esses empreendimentos podem propiciar à população melhores condições de transporte (segurança, conforto e rapidez). Os túneis permitem o transporte por via subterrânea, contornando obstáculos naturais ou construídos, e diminuem as distâncias dos deslocamentos.

Os túneis correspondem a uma forma de atender à crescente necessidade de ocupação do espaço subterrâneo, surgida a partir dos índices demográficos nos grandes centros urbanos e da consequente carência nos diversos setores de infraestrutura. Dessa forma, o emprego de obras subterrâneas nos transportes, no saneamento e na distribuição de gás, eletricidade e telecomunicações tem se mostrado uma solução interessante. A redução na ocupação dos espaços da superfície e a mitigação de impactos nos arredores das obras corroboram com esta ideia e ressaltam a importância dos túneis.

Na esfera da Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura Rodoviária e Aviação Civil, não existe uma metodologia estruturada para a realização de auditorias em projetos de construção de túneis rodoviários. Dessa forma, pretende-se que este trabalho auxilie na concepção dessa metodologia e crie ferramentas que tornem mais objetivas as fiscalizações em projetos de construção de túneis.

Ao realizar uma auditoria bem estruturada nas obras de túneis, busca-se garantir que os recursos federais sejam adequadamente aplicados.

Deverão ser expostos os aspectos teóricos relacionados ao projeto de obras de construção de túneis, entre eles:

- geologia e geotecnia;
- sondagens;
- metodologia construtiva;
- tipos e dimensionamento de suportes; e
- instrumentação e monitoramento.

O embasamento teórico a ser utilizado no trabalho será predominantemente lastreado em: trabalhos publicados pela Associação Internacional de Túneis e Espaço Subterrâneo (ITA– *International Tunnelling and Underground Space Association*); livros publicados; e dissertações de mestrado e teses de doutorado relacionados ao tema.

1.4 OBJETIVOS

Criar ferramentas que facilitem e tornem mais objetiva as fiscalizações em projetos de empreendimentos rodoviários que envolvam a construção de túneis, especialmente nos aspectos relacionados ao projeto.

Coletar e organizar dados com o intuito de facilitar a análise de um projeto de obra de construção de túnel. Apresentar um resumo teórico sobre o tema, de modo a disponibilizar uma fonte de consulta mais objetiva.

Apresentar os principais aspectos técnicos a serem objeto de análise numa auditoria de projeto de construção de túnel.

1.5 METODOLOGIA

O presente trabalho foi elaborado com base em ampla pesquisa bibliográfica. Foram consultados livros, dissertações de mestrado e teses de doutorado, sítios na internet, além de artigos técnicos. Da pesquisa bibliográfica, selecionaram-se os pontos mais sensíveis e de maior relevância, segundo a interpretação do autor, para que fossem sugeridas as diretrizes gerais de auditoria de projetos em obras de túneis.

As informações constantes do tópico “Fundamentação Teórica” a seguir são, em sua maioria, baseadas no documento “*Guidelines for the Design of Tunnels*”, elaborado pelo Grupo de Trabalho 7 (WG 7) da Associação Internacional de Túneis e Espaço Subterrâneo (ITA), que fornece uma visão ampla de como os projetos de túneis são desenvolvidos, considerando a experiência de diversos países integrantes da Associação. Ademais, foram inseridas informações complementares, quando necessárias, de forma a melhor descrever as etapas de elaboração de um projeto de construção de túnel.

Por fim, foram sugeridas diretrizes para auditoria em projetos de obras de construção de túnel.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RESUMO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE UM PROJETO DE TÚNEL

Em obras de túnel, na maioria das vezes, o maciço participa ativamente da sua estabilidade. Portanto, o procedimento de projeto para túneis, em comparação com as estruturas superficiais, é muito mais dependente de fatores como a situação do maciço, as características do subsolo e os métodos de escavação e de suporte utilizados.

A elaboração de um projeto de construção de um túnel requer, no mínimo, a participação interdependente das seguintes disciplinas:

- Geologia;
- Engenharia Geotécnica (mecânica dos solos e das rochas);
- Tecnologia de escavação (convencional x mecanizada);
- Projeto dos elementos estruturais de suporte, incluindo o comportamento a longo prazo dos materiais; e
- Diretrizes constantes do contrato e das leis.

Embora os especialistas em cada uma dessas disciplinas sejam responsáveis apenas por sua área específica de conhecimento, a decisão sobre os principais aspectos de projeto deve ser o resultado da integração cooperativa de todas as disciplinas. Apenas dessa maneira, pode ser assegurado que o projeto foi desenvolvido em unidade e não como a adição consecutiva do trabalho separado de cada um dos especialistas.

Os documentos básicos de um projeto de túnel devem incluir:

- O relatório geológico apresentando os resultados da pesquisa geológica e geofísica;
- O relatório hidrogeológico;
- O relatório geotécnico sobre as investigações do local, incluindo a interpretação dos resultados dos testes *in loco* e laboratoriais em relação ao processo de construção de túneis, classificação do solo e da rocha, etc.;
- Informação do alinhamento, seção transversal, drenagem e elementos estruturais que afetam o uso posterior do túnel;

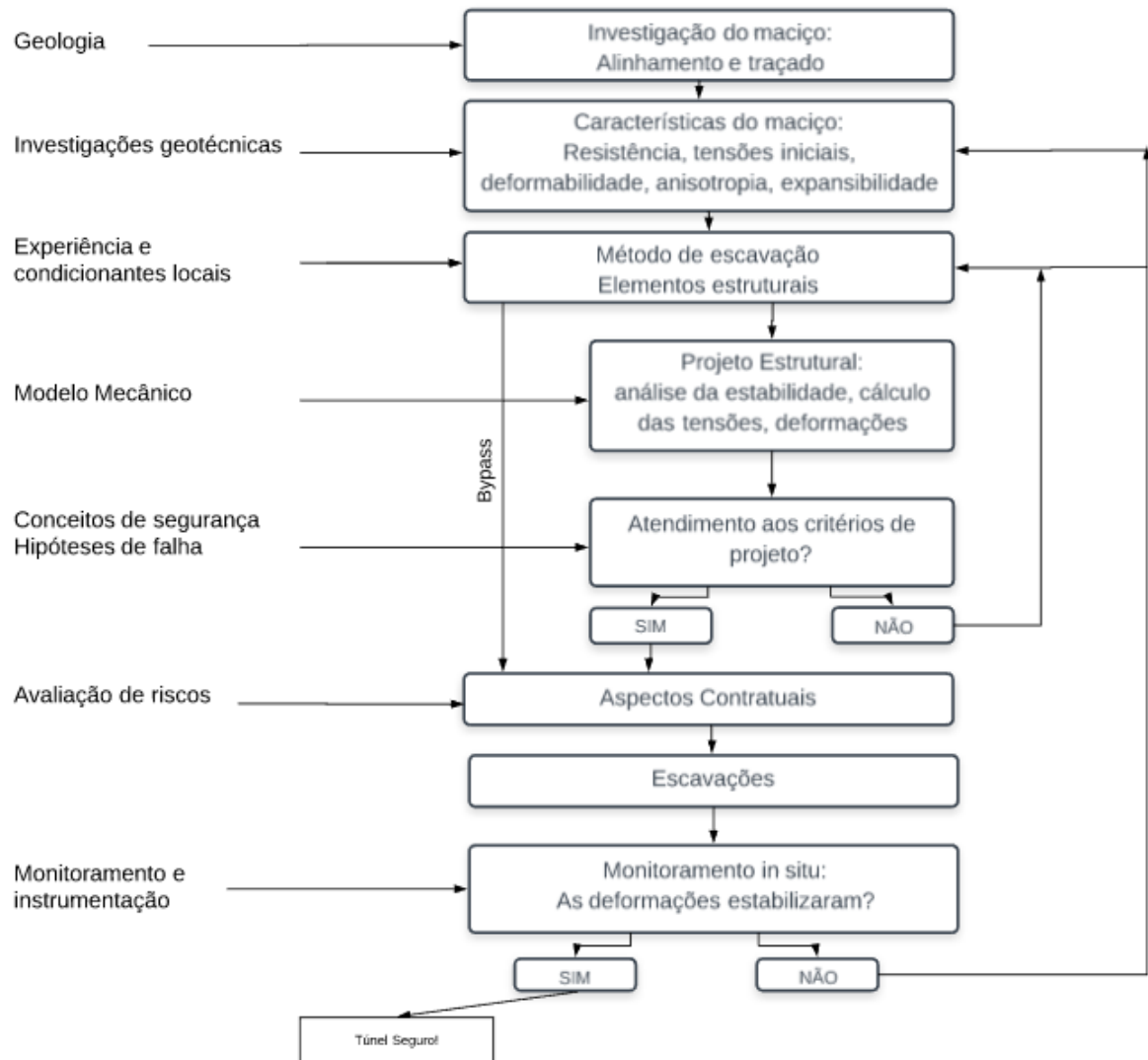
- Descrição do procedimento de escavação projetado, incluindo as diversas seções transversais relacionadas às diferentes condições do maciço;
- Documentos de projeto descrevendo os métodos de escavação e de suporte de túnel, considerando, por exemplo, avanço da escavação e suportes (tipos e número de ancoragens, chumbadores, cambotas, resistência do concreto projetado, etc.);
- O programa para o monitoramento *in situ* do túnel;
- Documentação dos problemas encontrados durante a escavação e medidas aplicadas, p.ex. melhoramentos no maciço ou alterações no tipo de suporte projetado, com base nos resultados de monitoramento;
- Durante e após as escavações, relato das medidas de campo e a interpretação de seus resultados em relação à resposta do maciço e à segurança estrutural do túnel;
- Análise de tensões e deformações (para túneis sem suporte e túneis com suportes primário e secundário) e o dimensionamento do suporte do túnel para fases intermediárias e revestimentos finais; e
- Documentos detalhados sobre a estrutura, para o projeto final do túnel.

Os principais elementos envolvidos no procedimento de projeto são mostrados como um diagrama de fluxo na Figura 1. Decorrente deste diagrama, tem-se os seguintes passos:

- (1) As investigações geológicas e locais devem confirmar o alinhamento, a orientação, a profundidade, etc., da escavação.
- (2) A sondagem e a mecânica dos solos devem ser aplicadas para determinar as características do maciço, ex. tensões *in situ*, resistência do solo e da rocha, falhas, condições hidrológicas.
- (3) Experiência e estimativas anteriores ou cálculos são usados para determinar a seção transversal necessária e a escolha do método de escavação do túnel, bem como os métodos de drenagem e a seleção dos elementos de suporte.
- (4) Depois que os passos (1) a (3) estiverem concluídos, o engenheiro deve derivar, ou mesmo criar, um modelo estrutural. Ao aplicar condições de equilíbrio e compatibilidade ao modelo, o engenheiro deve chegar aos critérios que determinam se o projeto é ou não seguro. Podem ser utilizados diferentes modelos para cada fase de escavação, para o suporte primário e o suporte

final, ou para diferentes comportamentos do maciço. A modelagem das características geométricas pode variar muito, dependendo da magnitude da análise.

(5) Um conceito de segurança, derivado de hipóteses de falha, pode ser baseado em critérios como tensão, deformação ou modos de falha.



**Figura 1 – Diagrama de fluxo de um projeto de túnel
(ITA, 1988)**

O *bypass* na Figura 1 indica que, para muitas estruturas subterrâneas, como na mineração ou na rocha rígida autoportante, nenhum modelo estrutural de projeto é aplicado ou calculado por métodos racionais. Nesses casos, experiências anteriores ou soluções empíricas podem ser suficientes.

Naturalmente, o monitoramento *in situ* só é aplicado após o início das escavações. Se os deslocamentos pararem de aumentar ao longo do tempo, normalmente, pode se assumir que a estrutura foi projetada com segurança. Os resultados de medições de campo e experiências durante a escavação podem obrigar o engenheiro a mudar o modelo de projeto, ajustando-o ao comportamento encontrado *in loco*.

Uma abordagem iterativa, passo-a-passo, é característica do projeto de estruturas que empregam a força autoportante do maciço (ver *loops* na Figura 1). O projetista pode começar aplicando modelos comportamentais estimados e simples. Os ajustes baseados nas experiências durante a escavação do túnel conduzirão a um modelo mais próximo da realidade e o tornará mais refinado. As interpretações de medidas *in situ* (e algumas retro análises) também podem ajudar os projetistas a fazer esses ajustes.

Todos os elementos do modelo da Figura 1 devem ser considerados uma unidade de interação. A dispersão de parâmetros ou imprecisão em uma parte do modelo afetará a precisão do modelo como um todo. Portanto, o mesmo grau de simplicidade ou refinamento deve ser fornecido sistematicamente a todos os elementos do modelo de projeto. Por exemplo, é incoerente aplicar ferramentas matemáticas muito refinadas simultaneamente com suposições grosseiras de características importantes do maciço.

A seguir, descrevem-se mais detalhadamente as etapas constituintes de um projeto de túneis, de acordo com as etapas ilustradas na Figura 1.

2.2 INVESTIGAÇÕES E AVALIAÇÕES DO MACIÇO

2.2.1 Dados geológicos e parâmetros do maciço

Os estudos e a caracterização geológica e geotécnica são essenciais na elaboração de um projeto de túnel e influenciam todas as fases seguintes, tanto as de projeto, quanto as de execução da obra.

A quantidade de investigações no maciço - *in loco* e em laboratório - pode variar consideravelmente de projeto para projeto. Como os tipos de exploração de solo e sondagens dependem das características intrínsecas a cada projeto de túnel, propósito, método de escavação, etc., eles devem ser escolhidos pela equipe de especialistas, notadamente em

consulta ao engenheiro de projeto. O nível das explorações do maciço dependerá da sua homogeneidade, do propósito do túnel, do custo da perfuração, da cobertura superficial ou profunda, da localização e de diversos outros fatores. Como referência no tema de investigações geotécnicas em túneis, destaca-se o documento “*Strategy for Site Investigation of Tunnelling Projects*”, elaborado pelo Grupo de Trabalho n. 2 (WG-2) da ITA.

A utilização dos métodos apropriados de caracterização, aliada à sua adequada execução, são fatores fundamentais na qualidade do reconhecimento geotécnico, permitindo aos diferentes especialistas a adoção de alternativas e critérios de cálculo menos conservadores (mais econômicos), sem perdas na confiabilidade.

A caracterização do maciço não é uma etapa que acaba com a conclusão do projeto básico, e deve ocorrer sistematicamente durante a construção do túnel, sendo assim possível refinar métodos de suporte, melhor dimensionar as estruturas e também escolher soluções para eventuais acidentes geológicos. Nesse sentido, o próprio mapeamento geomecânico feito após a escavação de cada seção é parte do processo de melhoria do modelo geomecânico do túnel.

Os estudos de caracterização geotécnica podem ser divididos em duas etapas, reconhecimento preliminar e prospecção de campo, detalhadas a seguir:

2.2.2 Reconhecimento preliminar

São estudos iniciais e provisórios. As atividades realizadas nessa etapa têm como objetivo auxiliar o planejamento das fases subsequentes de prospecção, além de buscar uma estimativa sobre os custos das explorações posteriores e também das escavações como um todo.

De acordo com Galera Fernández (1997), esta fase preliminar permite a obtenção de dados importantes para a caracterização, onde se destacam a morfologia e a litologia do maciço rochoso, a estratigrafia, o número e a posição dos aquíferos e a localização de possíveis acidentes geológicos.

Os métodos de investigação dessa fase devem incluir a consulta de informações já existentes sobre a região do túnel, como: estudos hidrológicos, outras obras subterrâneas próximas, caracterização geológica disponível e classificações geomecânicas.

Se não houver disponibilidade dos dados descritos no parágrafo anterior, pode-se proceder a uma análise geológica expedita, com uma visita ao local, a partir da observação das superfícies expostas dos terrenos e também a execução de furos com facilidade de execução (trados manuais ou mecânicos).

Também já devem ser avaliados, nessa fase, os pontos críticos, as principais restrições e as alternativas ao traçado, buscando selecionar as zonas mais favoráveis para a execução da obra, além de se analisar a viabilidade do empreendimento.

Por fim, com base nos resultados obtidos nesta fase inicial, deve-se definir um programa de prospecção e de ensaios (evidentemente, preliminar e sujeito a alterações) a serem realizados na fase posterior, descrita a seguir.

2.2.3 Prospecção de campo

Naturalmente, deve levar em conta os dados obtidos na etapa anterior, reconhecimento preliminar. Uma magnitude adequada da exploração local da obra, a partir da qual os mapeamentos geológicos e hidrológicos e os perfis de solo são derivados, é fundamental para a escolha do método apropriado de projeto e de escavação do túnel. Um relatório geológico bem documentado deve fornecer toda a informação obtida sobre as características físicas ao longo do eixo do túnel e na área adjacente. A quantidade total de informação deve ser muito maior do que a informação necessária para se utilizar em uma análise estrutural.

Os testes de campo e de laboratório devem ser apresentados em relatórios bem documentados e com resultados fidedignos. Com base nesses relatórios, é necessária uma interpretação dos testes para o processo de escavação e os requisitos de projeto para a análise estrutural. No momento em que os testes são planejados, a equipe de especialistas deve decidir quais as propriedades do terreno e as características do solo são necessárias para a descrição geotécnica geral do maciço e para o tipo de projeto. Assim, uma relação mais próxima pode ser alcançada entre a investigação do maciço e o projeto do túnel, e entre a quantidade e refinamento dos testes e os riscos das escavações.

Os métodos de prospecção normalmente utilizados são: geofísica e prospecção mecânica (com ensaios *in situ* e em laboratório), descritos a seguir.

Geofísica

Utiliza técnicas indiretas (métodos não destrutivos) para a detecção das características, e também de anomalias, dos materiais presentes no maciço. Apresenta como vantagens o baixo custo e a facilidade e a rapidez de execução. Os principais subtipos são: métodos sísmicos, elétricos e eletromagnéticos.

Segundo Galera Fernández (1997), o método sísmico mais utilizado é a refração, aplicável na detecção de espessuras de solos de cobertura e em maciços brandos, para detectar o nível do lençol freático. Este método possui a vantagem do baixo custo associado, mas geralmente não se obtêm bons resultados para profundidades superiores a 20 m ou quando camadas menos densas se encontram em maiores profundidades. O método é utilizado, preferencialmente, na caracterização da camada de alteração das zonas de emboque dos túneis.

Prospecção mecânica

Apresenta contato direto com o maciço, sendo possível a realização de ensaios *in situ* ou a extração de amostras para ensaiar em laboratório. A sondagem é o método de prospecção mecânica mais comum. Permite a obtenção de informações sobre as formações litológicas e, no caso de rochas, das discontinuidades, planos de estratificação, fissuras, diaclases e falhas.

Na realização da sondagem, devem ser documentadas coordenadas, cota, orientação e inclinação; o método de perfuração; a amostragem e os dados do equipamento. Ademais, devem ser obtidas as seguintes informações:

- o nível freático;
- os valores de SPT – *Standart Penetration Test*;
- a descrição geológica pormenorizada, que deve incluir, a descrição litológica, o grau de alteração, grau de coerência, grau de fraturamento, coloração e granulometria;
- porcentagem de recuperação e RQD – *Rock Quality Designation*.

Entre as desvantagens da sondagem estão o caráter local e pontual da amostra recolhida, sendo necessária uma interpretação rigorosa na elaboração dos perfis geotécnicos. As regras sobre a quantidade e a localização das sondagens devem considerar o conhecimento adquirido das fases

anteriores, procurando-se selecionar as zonas de características mais adversas ou sobre as quais existam maiores incertezas.

2.2.4 Ensaios

As propriedades do maciço que são relevantes para o projeto do túnel devem ser avaliadas o mais cuidadosamente possível, os testes *in situ*, que cobrem massas maiores, geralmente são mais significativos do que os testes laboratoriais em pequenas porções, que muitas vezes são as partes mais bem conservadas das amostras. A dispersão natural das propriedades do maciço requer um número adequado de testes paralelos - pelo menos três testes para cada propriedade.

Os resultados dos testes laboratoriais devem ser ajustados às condições do local. O tamanho da amostra, os efeitos das águas subterrâneas, a não homogeneidade do maciço no local e os efeitos da dispersão devem ser considerados. As conclusões dos testes também devem levar em consideração se as amostras foram retiradas do solo perturbado ou não perturbado.

Em muitos casos, a primeira parte da construção do túnel pode ser interpretada como um teste em grande escala, cujas experiências podem ser utilizadas não apenas para as escavações subsequentes, mas também para prever o comportamento do maciço.

Os principais ensaios de campo em testemunhos de sondagem são: ensaio de carga pontual, deslizamento de descontinuidades e esclerômetro. Com estes ensaios, buscam-se obter parâmetros correlacionáveis com a resistência à compressão simples, a resistência ao corte e a resistência ao deslizamento de descontinuidades.

Os ensaios laboratoriais mais comuns compreendem ensaios de identificação, mineralogia, densidade e umidade, e ensaios mecânicos como a compressão uniaxial, tração, compressão triaxial, ensaios de corte em rocha e ensaios de deslizamento de descontinuidades. Além disso, os valores obtidos nos ensaios relativos à deformabilidade e à resistência das rochas não deverão ser utilizados diretamente na caracterização do maciço. Deve ser procedida uma adaptação a uma escala devida, uma vez que os valores foram obtidos de amostras reduzidas ante a dimensão do maciço.

A partir dos ensaios executados, deverá ser possível estabelecer um ou mais modelos de comportamento do maciço que reflitam as características das formações e as propriedades mecânicas do maciço.

A seguir, apresentam-se as informações geotécnicas básicas que devem ser obtidas por meio das investigações geológicas, divididas por escavações em maciços rochosos e em solo.

2.2.5 Túneis em rocha

O maciço deve ser dividido em unidades geotécnicas para as quais as características de projeto podem ser consideradas uniformes. No entanto, características relevantes podem apresentar variações consideráveis dentro de uma unidade geotécnica. Os seguintes aspectos devem ser considerados para a descrição geológica de cada zona:

- Nome da formação geológica;
- Estrutura geológica e fraturamento da massa rochosa com espaçamento e orientação das fraturas;
- Parâmetros relacionados ao estado de tensão *in situ*;
- Cor, textura e composição mineral; e
- Grau de intemperismo.
- Parâmetros do maciço rochoso, em cinco classes de intervalos, incluindo: espessura das camadas; interceptação de fratura; classificação da rocha; recuperação do núcleo; força compressiva uniaxial da rocha, derivada de testes laboratoriais; ângulo de atrito das fraturas (derivado de testes de cisalhamento direto de laboratório); resistência do maciço *in situ*; propriedades de deformação (módulo); efeito da água na qualidade da rocha; e velocidade sísmica.
- Expansibilidade potencial da rocha. A presença de sulfatos, hidróxidos ou minerais de argila deve ser investigada por teste mineralógico. Um teste especial pode ser usado para determinar a curva de teste de expansão de uma amostra submetida primeiro a um ciclo carga-descarga e recarga em um estado seco e depois com água.

Devem ser obtidas as seguintes características hidrológicas:

- Permeabilidade;
- Pressão da água;
- Níveis de água, níveis piezométricos, variações ao longo do tempo, medidas de pressão em aquíferos confinados;
- Química da água;
- Temperatura da água; e
- Quantidade esperada de penetração de água.

Por fim, quando tuneladoras são empregadas, as seguintes propriedades adicionais são necessárias:

- Abrasividade e dureza;
- Compostos minerais, como por exemplo conteúdo de quartzo; e
- Homogeneidade.

2.2.6 Túneis em solo

Além das recomendações dadas acima para a escavação em rocha, a caracterização geotécnica deve apresentar outras descrições especiais para túneis em solo:

1. Identificação do solo (teste laboratorial):

- Análise granulométrica;
- Limites Atterberg;
- Densidades;
- Umidade;
- Permeabilidade; e
- Recuperação do núcleo.

2. Propriedades mecânicas:

- Ângulo de atrito;
- Coesão;

- Compressibilidade;
- Resistência ao cisalhamento não drenada (Teste de palhetas);
- Penetração N (Ensaio SPT); e
- Deformabilidade (Carga sobre placa, Dilatômetro).

2.2.7 Restrições geotécnicas

Deve estar documentado em projeto, em uma parte específica, um estudo sobre as restrições e condicionamentos geotécnicos. As principais restrições de caráter geotécnico são: acidentes geológicos, aquíferos de maior porte, região dos emboques, passagens sob cursos d'água, riscos sísmicos, existência de gases nos maciços rochosos, etc.

Os estudos sobre as restrições geotécnicas devem incluir a identificação das zonas com elementos geológicos que apresentem maior risco, e respectivas soluções a adotar, em caso de confirmação durante as escavações.

2.3 MODELOS DE PROJETO ESTRUTURAL DE TÚNEIS

Os principais objetivos da análise estrutural são fornecer ao engenheiro de projeto:

- (1) uma melhor compreensão da interação maciço-estrutura induzida pelo processo de escavação;
- (2) conhecimento de quais os tipos de riscos principais estão envolvidos e onde estão localizados; e
- (3) uma ferramenta para interpretar as observações do maciço e as medidas *in situ*.

Os métodos matemáticos disponíveis de análise são muito mais refinados do que as propriedades que constituem o modelo estrutural. Assim, na maioria dos casos, é mais apropriado buscar possíveis alternativas do modelo, ou mesmo modelos diferentes, do que buscar um modelo mais refinado.

Para a maioria dos casos, é preferível que o modelo estrutural empregado e os parâmetros escolhidos para as análises sejam ocorrências de limite inferior que possam provar que, mesmo em hipóteses desfavoráveis, o processo de escavação e o túnel em si são suficientemente

seguros. Em geral, o modelo de projeto estrutural não busca representar exatamente as condições reais do túnel, embora englobe essas condições.

O modelo estrutural deve estabelecer critérios relacionados a casos de falha contra os quais o túnel deve ser projetado com segurança. Esses critérios podem ser:

- Deformações e rigidez;
- Tensão e zonas de plasticidade;
- Falha no revestimento transversal;
- Falha na resistência do solo ou da rocha; e
- Análise-limite dos modos de falha.

Em princípio, as margens de segurança podem ser escolhidas de forma diferente para cada um dos casos de falha listados acima. No entanto, na prática, a avaliação das margens reais de segurança é mais complexa e muito afetada pela dispersão das propriedades envolvidas do maciço e da estrutura e, também pelas características probabilísticas interativas dessas propriedades. Portanto, os resultados de qualquer cálculo devem ser sujeitos a reflexão crítica para as condições encontradas.

As normas gerais para estruturas de concreto ou aço nem sempre são apropriadas para a concepção de túneis e seus elementos de suporte. As avaliações de segurança por meio de processamento de dados sempre devem ser complementadas por considerações gerais de segurança e de avaliações de risco, empregando a análise rigorosa de engenharia, que deve incluir os seguintes aspectos:

- As características do solo devem levar em consideração seus possíveis desvios em relação aos valores médios.
- O próprio modelo de projeto e os valores dos parâmetros devem ser discutidos pela equipe de projeto, com todos os especialistas.
- Programas de cálculo diferentes e mais simples, com variações paramétricas, podem descobrir a dispersão dos resultados. Em geral, essa abordagem oferece muito mais informação do que uma única pesquisa profundamente refinada.

- As medidas do monitoramento *in situ* devem ser usadas para ajustes sucessivos de modelos de projeto.
- A mensuração a longo prazo de deformações via extrapolação pode revelar em grande medida a estabilidade final da estrutura, embora o colapso repentino não pode ser anunciado antecipadamente.

A metodologia de dimensionamento dos suportes, assim como as campanhas de prospecção e o projeto, deverá ser dividida em etapas, com critérios sucessivamente mais precisos, em virtude do acréscimo gradual de informação. Este procedimento é vantajoso em termos econômicos, uma vez que compatibiliza o custo de projeto com o rigor necessário a cada etapa.

No dimensionamento de um túnel, a primeira questão a ser tratada pelo projetista é assegurar a estabilidade da frente de escavação. Na avaliação da estabilidade da frente de escavação é frequente o uso de métodos expeditos e ditados por considerações pragmáticas relacionadas à sua aplicabilidade prática. Estes métodos, baseados em parâmetros que podem ser obtidos com ensaios convencionais, são de fácil e rápida aplicação, permitindo a execução de várias análises que auxiliam o projetista, aumentando sua sensibilidade para a tomada de decisões relativas às soluções construtivas mais adequadas.

Apresentam-se a seguir os principais métodos de previsão de cargas em suportes de túneis.

2.3.1 Abordagem empírica

Os elementos estruturais e o procedimento de escavação, especialmente para o suporte primário do túnel, podem ser selecionados principalmente com base em experiências e considerações empíricas que dependem mais de observações diretas do que de cálculos numéricos. Este procedimento pode ser especialmente razoável se as experiências de um projeto bem-sucedido puderem ser aplicadas a uma nova obra similar ainda a ser projetada.

Uma das desvantagens da aplicação prolongada da abordagem empírica é que, sem um incentivo para aplicar um projeto de túneis mais apropriado, por meio de uma avaliação consistente da segurança, a estrutura pode ser projetada de forma superconservadora, resultando em maiores custos de construção. A abordagem empírica simples pouco contribui para o avanço do estado da arte da engenharia de túneis.

Além disso, a maior desvantagem da abordagem empírica é a não previsão do fator de segurança do túnel, nem dos deslocamentos induzidos pelas escavações.

De toda forma, a abordagem empírica do projeto do túnel pode ser aplicada a projetos maiores, em terreno ligeiramente diferente, se for feita provisão (especialmente na licitação) para que as experiências iniciais sejam extrapoladas para as seções subsequentes ao longo do eixo do túnel. Tal situação exige um programa de medição mais intensivo para as primeiras seções, com o objetivo de se obter mais informações sobre o maciço.

2.3.2 Classificações Geomecânicas

Num estágio de Estudo Prévio, quando a informação disponível é escassa, o cálculo dos suportes deve ter o propósito de balizar as soluções dentro de limites razoáveis, evitando limitar ou direcionar excessivamente as soluções.

Nesta fase, as classificações geomecânicas podem ser um instrumento útil, e geralmente são suficientes para alcançar os objetivos pretendidos, pois fornecem uma aproximação do tempo de auto suporte para um determinado vão.

Existem várias classificações geomecânicas, propostas por diversos autores, destacando-se entre elas as classificações de Bieniawski (1984) e de Barton (2000), pois são as de aplicação mais comum e conseqüentemente as que apresentam maior experiência acumulada. Definida a classe do maciço rochoso, é possível fazer recomendações sobre métodos de escavação, e sobre os tipos de contenções indicados. Apresenta-se a seguir um breve resumo sobre essas duas principais classificações.

Bieniawski

A classificação geomecânica de Bieniawski é de uso relativamente simples e prático e considera cinco parâmetros característicos do maciço rochoso, atribuindo a cada um diferentes pesos relativos. Os parâmetros desta classificação são:

- 1) Resistência à compressão uniaxial da rocha ou o índice de resistência à compressão pontual [MPa];
- 2) Índice RQD, relativo à qualidade da perfuração [%];

- 3) Grau de fraturamento do maciço, por meio do espaçamento médio entre descontinuidades [m];
- 4) Estado das descontinuidades;
- 5) Condições hidrogeológicas, aferidas pelo volume de água a cada 10 m de túnel ou pela relação entre a pressão da água intersticial e a tensão principal máxima ou pelas condições gerais (maciço drenado, ressurgências, etc.).

O somatório dos pesos é ainda retificado de acordo com a orientação das descontinuidades (ângulos e posição relativa ao eixo do túnel). Assim, chega-se a um valor final, denominado RMR (*Rock Mass Rating*), que determina em que classe o maciço rochoso se enquadra, numa escala de I a V, crescente com a redução de qualidade do maciço.

Barton

Já a classificação geomecânica de Barton considera seis parâmetros:

- 1) Índice RQD (*Rock Quality Designation*), da qualidade da furação [%];
- 2) Jn: Grau de fraturamento do maciço, ponderado de acordo com o número de descontinuidades presentes e sua posição relativa;
- 3) Jr: Estado das descontinuidades, segundo a rugosidade;
- 4) Ja: Grau de alteração das descontinuidades;
- 5) Jw: Condições hidrogeológicas, aferidas pelo volume de água; e
- 6) Estado de tensão *in situ* SRF, relacionado à existência de zonas de baixa resistência.

A partir desse critério, Barton criou uma relação empírica para o cálculo do índice de qualidade do maciço rochoso, Q:

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \cdot \frac{Jr}{Ja} \cdot \frac{Jw}{SRF}$$

Com o valor de Q, pode-se determinar o tempo de auto suporte, o vão máximo sem suporte, além dos tipos de suporte a serem instalados.

Cabe ressaltar que as classificações geomecânicas, justamente por se tratarem de caracterização preliminar, apontam, normalmente, para soluções mais conservadoras em termos de cálculo e quantificação de suportes, levando a custos mais elevados.

2.3.3 Modelo de projeto alternativo

A escavação de um túnel altera o campo de tensão *in situ* para um padrão tridimensional na face do túnel. Distante da face, o campo de tensão retornará a um sistema essencialmente bidimensional. Portanto, o projeto do túnel pode considerar apenas os campos de tensão-deformação bidimensionais como primeiras aproximações.

O projeto deve levar em conta a interação entre o maciço e o suporte. Para isso, o suporte deve ser colocado o mais próximo possível do maciço. Para preservar a sua resistência natural, o terreno deve ser mantido tão imperturbável quanto possível. As deformações resultantes do processo de escavação reduzem a pressão primária no solo e criam tensões no suporte correspondente à parte das tensões primárias no maciço que sofreram alívio.

As tensões dependem da relação de rigidez do maciço com o suporte, bem como com a forma da seção transversal do túnel. A seção transversal deve ser escolhida de modo que possa se desenvolver uma ação arqueada no maciço e no suporte.

2.3.4 Modelo de anel e placa

Nesse modelo, o suporte é representado por um anel contínuo e o maciço, por uma placa. É assumido um estado plano de deformações (bidimensional) em seções mais afastadas da face de escavação.

As solicitações no suporte sofrem intensa influência do campo de deslocamentos oriundo do início das escavações. Esse campo de deslocamentos mobiliza tensões de cisalhamento no maciço, com uma redução significativa das cargas solicitantes no suporte. Contudo, as tensões de cisalhamento mobilizadas não permanecem constantes, levando a frequentes movimentações do suporte. Assim, o dimensionamento do suporte deve prever a absorção das variações de diâmetro necessárias ao estabelecimento de um campo uniforme de tensões sobre si.

Quando se considera o suporte instalado simultaneamente à escavação, desprezam-se os deslocamentos sofridos pelo maciço, e tem-se a hipótese de rigidez absoluta. Dessa forma, a tensão aplicada pelo suporte sobre o maciço recém escavado terá valor igual à tensão natural atuante no maciço previamente à escavação.

2.3.5 Modelo de anel e mola

Nesse modelo, o maciço é representado por um número finito ou infinito de molas, já o suporte é considerado por um anel. Considera-se ainda o modelo bidimensional (estado de deformações planas). A rigidez do maciço é modelada como a rigidez desse conjunto de molas, que tem reações proporcionais aos deslocamentos, quando é submetido a cargas. O conjunto de molas pode ser representado por apenas molas radiais ou também pela associação de molas radiais e tangenciais.

Os resultados de comparações efetuadas entre os modelos de anel/placa e anel/mola foram próximos, quando consideradas a associação de molas radiais e tangenciais. De toda forma, pode-se dizer que esse modelo fornece resultados mais próximos da realidade que o modelo de anel e placa. Tal fato decorre da possibilidade de se atribuir constantes diversas de mola que representam os variados valores de rigidez do maciço ao longo do contorno do túnel e das etapas de construção.

2.3.6 Métodos numéricos

A modelagem adotando o método numérico tem-se mostrado de grande utilidade. Adotado geralmente quando os métodos analíticos apresentam limitações, devido a geometria irregular e complexa das escavações e da heterogeneidade do maciço. Os métodos numéricos mais comuns são: método das diferenças finitas (MDF), método dos elementos de contorno (MEC) e método dos elementos finitos (MEF).

Com esses três métodos é possível simular o comportamento tridimensional do maciço durante as escavações, com resultados bem próximos da realidade. Entretanto essas simulações exigem uma entrada de dados bastante refinada.

2.3.7 Método observacional

Ao combinar métodos analíticos com a abordagem empírica e as interpretações imediatas das medidas *in situ*, pode ser aplicado um procedimento de projeto, que é ajustável à medida que a escavação do túnel prossegue. Nessa abordagem, as medidas de campo dos movimentos do maciço, deslocamentos e tensões no suporte são usadas de forma contínua para verificar ou modificar o projeto do túnel. Seções mais intensamente instrumentadas nos estágios iniciais da escavação fornecem os dados para esses procedimentos. A interpretação dos dados coletados produz uma visão da reação do maciço ante os procedimentos de escavação.

É importante mencionar que, na prática, todo projeto de túnel sempre é submetido a adequações, durante a construção, em decorrência da aplicação do método observacional.

2.4 SUPORTES

2.4.1 Melhoramentos e reforços do maciço

Antes de tratar dos tipos de suporte propriamente dito, cabe apresentar outro método de suporte (na realidade, um “pré-suporte”), chamado de melhoramento ou reforço do maciço, que limita as convergências e recalques e que são aplicados antes da escavação. São utilizados em maciços muito brandos ou pouco coesivos, e possibilitam um reforço à sua capacidade de suporte. Exemplos desses métodos são:

Drenagem: Procede-se ao rebaixamento do nível do lençol freático, com a consequente redução da pressão da água e assim, a possibilidade de ocorrência de rupturas na face e no teto da escavação.

Enfilagens: elementos longitudinais, instalados no contorno da abóbada, construídos antes da escavação, para manter a sustentação do maciço até a aplicação do suporte.

Jet Grouting ou grauteamento: tratamento do solo mediante a injeção de calda de cimento, a alta pressão e velocidade, que se mistura com o terreno existente, originando a coluna de solo-cimento. Aplicado para fechar discontinuidades na rocha ou para melhorar o solo pouco coeso, e objetivando alcançar uma maior homogeneidade.

Congelamento: utilizado em casos extraordinários em que as outras técnicas não são viáveis (por exemplo, solos saturados com alto teor de finos), pode-se proceder a solidificação temporária da água presente no maciço. Cria-se assim, uma parede rígida e impermeável, com capacidade de suporte superior à encontrada previamente ao congelamento.

2.4.2 Suportes primários

Segundo Bastos (1998), a instalação do suporte primário é uma fase muito importante na construção do túnel. Na maioria das obras subterrâneas, o suporte primário permanece instalado por toda a vida útil da obra, uma vez que não é retirado no momento da instalação do suporte definitivo. Assim, devem-se considerar dois pontos importantes para o seu dimensionamento:

- 1) O fato de o suporte primário cumprir sua função efetiva apenas por um curto intervalo de tempo, correspondente à execução da obra, deve ser considerado nos cálculos, uma vez que o seu caráter temporário deve ser levado em conta na redução do fator de segurança atribuído a estes elementos.
- 2) Ao assumir a não remoção dos suportes primários, garante-se a sua atuação por toda a vida útil, fato que deverá ser considerado no dimensionamento dos suportes definitivos.

O dimensionamento do suporte provisório, à semelhança das campanhas de prospecção e projeto, deve ser dividido em fases, com critérios sucessivamente mais refinados em virtude do gradual acréscimo de informação. Este procedimento é vantajoso em termos econômicos, uma vez que compatibiliza o custo de projeto com o rigor necessário a cada etapa. Como exemplos de suporte primário listam-se: concreto projetado, cambotas, pregagens, ancoragens, tela metálica, chapas metálicas ou de concreto, tirantes, chumbadores, madeira, etc.

Concreto projetado: trata-se de método de suporte amplamente utilizado, com aplicação na grande maioria das escavações com método convencional. Desempenha papel fundamental na sustentação a curto prazo do maciço. É aplicado por meio de um equipamento dotado de uma mangueira com um dispositivo para misturar os diversos componentes do concreto.

Vantagens: aplicação quase imediata após a escavação, pode ser aplicado com espessura variável, de acordo com as necessidades apontada pela instrumentação. Preenche os vazios decorrentes da sobreescavação. Não necessita de escoramento, formas e armaduras. Tempo de pega variável (uso de aditivos). Flexibilidade e durabilidade.

Desvantagens: pode não ser bem aplicado em regiões de sombra (atrás de cambotas); deve ter aplicação cuidadosa, para evitar desperdícios (reflexão).

Cambotas metálicas: método de suporte primário amplamente utilizado, com aplicação em solos e rochas muito fraturadas. São anéis metálicos, constituídos por perfis de aço ou por elementos treliçados (também chamadas treliças metálicas), instalados para dar suporte imediato ao maciço, enquanto o concreto projetado não atinge sua resistência esperada.

Vantagens: excelente resistência mecânica aos esforços de tração e de compressão, elevada resistência aos momentos de flexão; elevado módulo de elasticidade e ductilidade; facilidade de fabricação; homogeneidade e controle de qualidade simples.

Desvantagens: Custos associados, necessidade de tratamentos anti-corrosão, dificuldades na instalação, dependendo de suas dimensões.

Tela metálica: normalmente utilizada como suporte primário, em atuação conjunta com as cambotas e o concreto projetado. Tem como função principal reduzir as perdas do concreto projetado por reflexão. Indicada para utilização em maciços com fraturamento significativa, uma vez que constitui um método semi-contínuo, menos dependente de erros de observação ou de métodos de pré-dimensionamento insuficientes.

Vantagens: aumenta a resistência à tração e a ductilidade da camada de concreto projetado.

Tirantes: são elementos estruturais que transmitem um esforço superficial no terreno para uma região pré-determinada no maciço. Normalmente associados a outros tipos de suporte (cambotas e/ou concreto projetado), principalmente quando estes não possuem resistência suficiente para evitar deformações excessivas.

Chumbadores: são similares aos tirantes, porém não são pré-tensionados. A resistência do chumbador é ativada pelo deslocamento do maciço.

2.4.3 Suportes secundários

Pode apresentar função estrutural (suporte de fato) ou função meramente estética (revestimento). Em ambos os casos, devem ser levados em consideração, nos cálculos do suporte, os sistemas de suporte primário, com vista a otimizar o suporte global e reduzir os custos.

O suporte secundário de um túnel é, em geral, uma estrutura de aço ou concreto que envolve a cavidade do túnel. Este revestimento pode ser aplicado sobre o sistema de suporte primário ou diretamente sobre o maciço, para túneis autoportantes ou apenas com elementos de suporte primário descontínuos (pregagens, ancoragens).

O suporte de um túnel pode ser realizado por concretagem com formas deslizantes ou por colocação de peças de concreto pré-fabricadas.

Podem ter as seguintes funções:

- Função estrutural, para garantir a estabilidade durante a vida útil do túnel;
- Estética, proporcionar um acabamento final com aspecto uniforme e agradável;
- Funcional, por regularizar a superfície do túnel, proporciona melhoria no funcionamento dos sistemas de ventilação e iluminação; e
- Impermeabilização, pode ser feita a impermeabilização também nessa fase construtiva, de modo a impedir o fluxo de água para o interior do túnel.

2.5 MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO

O monitoramento *in situ*, durante a escavação e em intervalos mais longos após o término do túnel, deve ser considerado parte integrante do projeto, não só para verificar a segurança estrutural e o modelo de projeto aplicado, mas também para verificar a concepção básica da resposta do maciço à escavação e a eficácia do suporte estrutural.

O monitoramento e a instrumentação têm importância vital nas obras atuais e constituem um dos apoios do tripé dos fundamentos da moderna construção de túneis:

- 1) maciço circundante;
- 2) sistemas de suporte; e
- 3) monitoramento e instrumentação.

Considerando a complexidade da obra de um túnel – dada as diversas incertezas relativas à caracterização geotécnica do maciço, as várias características que só são descobertas durante as escavações – a instrumentação da obra deve ser um fator primordial e ser parte integrante do projeto de construção do túnel.

O monitoramento tem como principais objetivos:

- comparação com as previsões de projeto: observar se os modelos geotécnicos de projeto estão compatíveis com o comportamento observado durante e após as escavações;
- verificar a compatibilidade das técnicas utilizadas (escavação e suporte) e a sua qualidade de execução;
- segurança: obter informações acerca da estabilidade das escavações, além do espaço circundante (edificações na vizinhança);
- permite extrapolar o comportamento observado em seções já escavadas para as seções ainda a escavar, e, indiretamente, permite a melhoria dos métodos de escavação como um todo, por meio da retro análise; e
- após a conclusão da obra, controlar a evolução dos carregamentos e das deformações para prevenção de eventuais anomalias.

Diante dos objetivos do monitoramento elencados acima, tem-se o benefício geral que é a redução dos atrasos na construção, pois o monitoramento permite antecipar a previsão da necessidade de materiais. Desse modo, é possível obter mais segurança e adequabilidade dos sistemas de suporte, compensando os eventuais atrasos devidos à observação.

Deve-se destacar, ainda, além da questão do monitoramento e da instrumentação em si, a importância da rapidez com que esses dados coletados chegam ao destinatário e, principalmente, o plano de ações adotado (por exemplo, em caso de distorções em relação aos dados normalmente esperados).

As deficiências mais comuns encontradas nas atividades de monitoramento de obras subterrâneas são:

- Falhas no planejamento: relativamente ao tipo de informação necessária, variáveis de controle, verificação das condições geológicas, controle de métodos de escavação;
- Indefinição das condições iniciais de referência: instalação dos equipamentos de monitoramento com atraso, ou deficiências na periodicidade das leituras, desconhecendo-se os movimentos anteriores à instrumentação;
- Inexperiência dos operadores dos equipamentos: falhas na instalação dos equipamentos ou na detecção do seu mau funcionamento, lacunas na identificação dos sinais de instabilidade;

- Atrasos na avaliação e na interpretação: incapacidade de tratar a informação no local da obra, com a subsequente necessidade de envio da informação para outras entidades que desconhecem o empreendimento, comprometendo a possibilidade de intervenção imediata;
- Danos aos equipamentos causados pelas atividades de escavação/construção: erros ou paralisação das leituras;
- Indefinição das responsabilidades do empreiteiro: relativamente à colaboração e ao pagamento destas atividades, resultando incompreensão e falta de apoio;
- Equipamentos inadequados: relativamente à aplicabilidade, necessidade, robustez e complexidade; e
- Diminuição da observação por limitações de orçamento: a tentativa de redução de custos acarreta restrição do número de observações nos equipamentos existentes, não instalação de outros instrumentos e deficiências na análise e tratamento dos dados.

2.5.1 Métodos de monitoramento

Um programa para monitorar as deformações e tensões durante a escavação deve compreender as seguintes medidas:

- (1) Nivelar a coroa dentro do túnel o mais rápido possível. No que diz respeito à interpretação dos dados, muitas vezes apenas uma pequena fração do movimento da coroa inteira pode ser monitorada porque uma parte maior ocorre antes que o parafuso possa ser instalado. Para condições adversas de escavação, a distância entre duas leituras da coroa deve ser da ordem de 10 m a 15 m. O monitoramento do nível do *invert* é recomendado para rochas expansivas.
- (2) As leituras de convergência devem ser o método padrão para informações em tempo real. São facilmente aplicáveis e têm precisão de cerca de 1 mm.
- (3) Em algumas seções transversais, os suportes podem estar equipados com células de tensão para ler as pressões do solo e as forças do anel no suporte.
- (4) As células de tensão também devem ser instaladas em algumas seções do suporte final se as leituras de longo prazo forem desejadas após o túnel ter sido concluído.
- (5) A medição do nível da superfície ao longo do eixo do túnel e perpendicular a ele estabelece recalques e a correlação com as medidas dentro do túnel.

(6) Os extensômetros, os inclinômetros, os micrômetros de deslizamento podem ser instalados a partir da superfície bem à frente da face do túnel, produzindo medições de deformação no maciço. O monitoramento das deformações é especialmente indicado para verificar e interpretar o modelo de projeto.

Portanto, a instalação deve ser combinada com leituras de convergência e células de tensão na mesma seção transversal. A frequência das leituras depende da distância da face do túnel que as medidas são tomadas e também dos resultados. Por exemplo, as leituras podem ser realizadas inicialmente duas vezes por dia; então pode-se reduzir a uma leitura por semana a uma distância de quatro diâmetros da face; e terminar com uma leitura por mês se as curvas de dados de tempo corroborarem por essa redução nas medições.

2.5.2 Interpretação dos resultados do monitoramento *in situ*

Os resultados do monitoramento *in situ* devem ser interpretados considerando: as etapas de escavação, o suporte estrutural e o modelo estrutural em conjunto com as especificações de segurança. As leituras geralmente mostram uma ampla dispersão de valores. As expectativas de confiabilidade podem não ser cumpridas, especialmente para células de pressão, pois as pressões e tensões são características muito inerentes ao local. As leituras de deformação e convergência são obtidas de forma mais confiável porque os deslocamentos registram integrais ao longo de uma maior seção do solo. As medidas *in situ* devem ser interpretadas levando em consideração o seguinte:

- Os resultados devem verificar se o método de construção do túnel é apropriado;
- Gráfico com o histórico das medições pode revelar uma taxa decrescente de deformação, ou descobrir o risco de colapso;
- Grandes discrepâncias entre as deformações teoricamente previstas e realmente observadas podem forçar a revisão do modelo de projeto. No entanto, as medidas feitas são válidas apenas para o momento e o local onde foram tomadas. As influências a longo prazo, como o aumento do nível da água, as vibrações do trânsito e o rastreamento a longo prazo, não são registradas durante a escavação;
- As leituras podem promover a compreensão visual do comportamento estrutural da interação do solo e do suporte;

- As leituras podem cobrir apenas uma fração do fenômeno real se os parafusos e células de tensão estiverem instalados tardiamente; e
- O túnel pode ser considerado estável quando todas as leituras deixam de aumentar. No entanto, uma margem de segurança contra falhas - especialmente colapso súbito - não pode ser deduzida da medição, exceto por extrapolação.

3 DIRETRIZES PARA AUDITORIA EM PROJETOS DE CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS

A seguir, tomando como referência o conteúdo teórico exposto anteriormente, apresentam-se as diretrizes gerais para auditoria em projetos de construção de túneis rodoviários.

As recomendações compiladas no presente trabalho correspondem a parâmetros básicos, consideradas primárias ou mínimas. Conforme visto na parte teórica, cada projeto de túnel é considerado único, devido à diversidade das características geológicas e geotécnicas. Assim, as informações e dados expostos a seguir, naturalmente, não devem ser interpretados como regras rígidas e imutáveis.

3.1 ESTUDOS PRELIMINARES

São os estudos que antecedem o projeto básico. Inicialmente, deve ser verificada a análise de viabilidade do empreendimento, etapa em que deve ser apresentada a avaliação técnico-econômica. Segundo o Roteiro de Auditoria de Obras Públicas do TCU, aprovado pela Portaria Segecex n. 33, de 7/12/2012, devem ser verificados:

- a existência de parecer técnico favorável à execução da obra, elaborado com base na análise e escolha da alternativa mais viável sob os aspectos técnico, econômico e ambiental do empreendimento;
- a existência de desenhos e memorial descritivo da alternativa selecionada, suas características principais, as demandas a serem atendidas, o pré-dimensionamento dos sistemas previstos e respectivos critérios, índices e parâmetros utilizados;
- se os aspectos físicos, ambientais e legais foram considerados em relação ao empreendimento que se pretende instalar, indicando as medidas de controle a serem adotadas;
- a existência de estimativas de custos do empreendimento, inclusive projeções quanto ao custo de operação e manutenção, vida útil, produtividade etc.;
- se os critérios e as justificativas da escolha do local de implantação do empreendimento foram adequados;
- a qualificação da equipe responsável por elaborar os estudos de viabilidade; e

- a existência de licença ambiental prévia, antes da fase de projeto básico, a fim de assegurar o adequado tratamento do impacto ambiental do empreendimento, nos termos do art. 12, VII, da Lei 8.666/1993.

Ademais, devem ser verificados na etapa de estudos preliminares:

1 – Se foi feita uma análise dos maiores riscos e restrições de projeto, principalmente no que se refere a:

- identificação de falhas geológicas e zonas de alteração;
- existência de condições geotécnicas extremamente desfavoráveis que causem riscos ao empreendimento, como por exemplo grandes instabilidades do maciço; e
- interferências superficiais ou subterrâneas, ex.: gasodutos, redes de alta tensão, edifícios, fundações, etc.

2 – Se foi elaborada pelo menos uma estimativa dos principais custos da obra, levando em conta o seguinte:

- a partir dos dados geotécnicos disponíveis, mesmo que preliminares, é possível fazer uma estimativa dos quantitativos de maior materialidade da obra (volumes de escavação, concreto projetado, cambotas, chumbadores, serviços de impermeabilização e de drenagem e sistemas de ventilação e de iluminação, etc.); e
- que na fase de estudos preliminares, as estimativas normalmente são feitas com base em pré-dimensionamentos simplificados, análises expeditas ou em comparação com projetos similares anteriores.

3.2 PROJETO BÁSICO

Nessa etapa, aprofundam-se as investigações feitas na fase anterior, estudos preliminares. Inicialmente, numa análise inicial e expedita, devem ser verificados se minimamente estão presentes os seguintes itens no projeto básico:

- O relatório geológico com os resultados da pesquisa geológica e geofísica;
- O relatório hidrogeológico;

- O relatório geotécnico sobre as investigações do local, com interpretação dos resultados dos testes *in loco* e laboratoriais;
- Informação sobre alinhamento, seção transversal, drenagem e elementos estruturais que afetam o uso posterior do túnel;
- Procedimento de escavação projetado, com as diversas seções transversais relacionadas às diferentes condições do maciço;
- Descrição dos métodos de escavação e de suporte (avanço da escavação, suportes, tipos e número de ancoragens, chumbadores, cambotas, resistência do concreto projetado, etc.);
- O programa de monitoramento do túnel;
- Documentação dos problemas encontrados durante a escavação e medidas aplicadas, p.ex. melhoramentos no maciço ou alterações no tipo de suporte projetado, com base nos resultados de monitoramento; e
- Os projetos para impermeabilização e drenagem.

A seguir, são detalhadas as principais partes de um projeto de túnel e respectivos itens a serem objeto de verificação.

3.2.1 Projeto Geométrico

É necessário ter em mente que o projeto geométrico, com as informações obtidas a partir dos estudos geológicos e geotécnicos, deve considerar o posicionamento e alinhamento do túnel visando à redução dos custos e otimização do tempo de execução da obra. Assim, deve ser verificado:

- se foi feita a compatibilização do projeto do túnel com o projeto geométrico do restante da rodovia; e
- se foi realizada a vistoria de toda a área abrangida pela obra, para a realização do levantamento cadastral da região, para o registro das edificações e das interferências subterrâneas que possam sofrer danos com a obra (ademais, verificar a atualidade desse levantamento).

Além disso, tendo em vista as particularidades e restrições do projeto, verificar se foram observadas as seguintes características para o projeto geométrico:

- evitar curvas verticais côncavas, pois requerem um sistema de esgotamento de água e drenagem forçadas, que são fatores que podem onerar o custo de construção e manutenção do túnel;
- em túneis de grande extensão, por questões de segurança e bem estar do condutor, verificar se foram projetadas curvas suaves, próximas ao emboque e ao desemboque, de modo a evitar que o condutor tenha visão do final do túnel, (evitar o efeito psicológico de fuga, com aumento da velocidade do veículo);
- quando existirem curvas horizontais no túnel, devem ser consideradas a sensação de confinamento e a diminuição de visibilidade provocados pelas laterais do túnel, com a previsão de eventuais medidas amenizadoras desse desconforto; e
- previsão de baias de estacionamento e saídas de emergência, que devem estar em conformidade com os normativos do Corpo de Bombeiros de atuação correspondente à localização do túnel.

3.2.2 Topografia e Cadastro de Interferências

Devem ser verificadas as datas de elaboração da topografia e do cadastro de interferências, que devem estar atualizados.

A IP-DE-C00/002 (2005) recomenda que a área de abrangência do levantamento deve englobar, no mínimo “uma faixa maior do que duas vezes a profundidade do túnel, estimada pela distância entre a superfície e a geratriz inferior do túnel, para cada lado do eixo, ou uma faixa de 10 vezes o diâmetro estimado do túnel, sendo a menor entre elas.”. A mesma instrução indica que, para túneis paralelos, o diâmetro a ser considerado no cálculo anterior deve ser o equivalente à distância entre os pontos externos mais extremos da escavação.

3.2.3 Projeto das Praças do Emboque e do Desemboque

O projeto das praças deve ser adequadamente elaborado, de forma a permitir o acesso e as manobras dos veículos e equipamentos utilizados na construção do túnel.

Também deve levar em consideração a minimização dos impactos ambientais (redução de supressão da vegetação, interferências na fauna e na flora), nas circunvizinhanças da obra,

principalmente em áreas povoadas, deve-se atentar à redução dos distúrbios provocados (sonoros, poluição, aumento do trânsito decorrente do fluxo de máquinas, etc.).

No projeto da praça de emboque, devem ser apresentados:

- os quantitativos de terraplenagem;
- as análises de estabilidade dos taludes e o projeto das contenções; e
- o plano de bota-fora, que deve estar compatibilizado com o projeto de terraplenagem do restante da rodovia.

3.2.4 Projeto dos Emboques dos Túneis

Por ser uma região em que as características do maciço são mais desfavoráveis, deve ser objeto de estudos mais cuidadosos e detalhados. Nas regiões de acesso ao emboque e desemboque, devem ser observados:

- proteção contra desprendimentos de materiais do talude a montante (por exemplo, contenções frontais, taludes mais abatidos e com bermas que amortecem a queda de objetos);
- drenagem do talude, de modo a evitar erosões e quedas de grandes volumes de água nos veículos;
- segurança contra vandalismo, o projeto deve contar com mecanismos que inibam o lançamento de objetos sobre a pista de acesso ao túnel (por exemplo, o falso túnel de proteção); e
- dispositivos para acomodação visual na entrada e saída do túnel (desconforto provocado pela diferença entre a iluminação externa e interna).

3.2.5 Estudos geológicos e geotécnicos

Verificar se os estudos geológicos apresentam, no mínimo:

- a geomorfologia do maciço e da região afetada pelas escavações;
- unidades geológicas maiores;
- disposições estruturais;
- zonas de alteração;

- classificação de materiais para escavação;
- elaboração da compartimentação geomecânica do maciço;
- determinação hidrogeológica;
- identificação e análise de risco geológico; e
- investigações sobre atividades tectônicas na região.

Verificar se os estudos geotécnicos apresentam, no mínimo:

- a quantidade suficiente de sondagens para embasar adequadamente a classificação do maciço;
- a classificação geotécnica do maciço quanto ao tipo e origem do solo;
- a previsão de comportamento do maciço durante as escavações junto à frente de escavação;
- os parâmetros geotécnicos de resistência, deformabilidade e permeabilidade; e
- elaboração dos critérios para definição dos parâmetros geotécnicos de cálculo, específicos para cada tipo de análise.

3.2.6 Sondagens

O número de sondagens, sua localização, profundidade, tipos, são dependentes da geologia local e do risco causado pela construção do túnel. Normalmente, nas regiões de emboque e desemboque, há uma maior concentração de sondagens, por ser uma área de maior risco (as características do terreno normalmente são mais desfavoráveis) e pela menor cobertura do maciço (melhor acessibilidade para execução).

A IP-DE-C00/002 (2005) recomenda que sejam realizados no mínimo três sondagens e uma seção transversal de levantamento geofísico em cada emboque. Há também a recomendação de se realizarem sondagens em perfis de interface nas zonas de transição entre solo e rocha que possam interferir significativamente nas quantidades de escavação, suporte e tratamento do maciço.

Em Souza (2012), são indicadas as seguintes referências para o número de sondagens necessárias numa investigação geológica para um projeto de túnel:

a)

$$E = \frac{2d}{g}$$

$$T = \frac{ecr}{g}$$

Onde,

E = comprimento das sondagens no emboque;

T = comprimento das sondagens no trecho em túnel;

d = extensão ao longo do túnel com cobertura inferior a 5 diâmetros de escavação;

g = grau de complexidade geológica, variável de 0,4 para alta complexidade e 1,0 para baixa complexidade;

e = extensão do túnel, em metros;

c = cobertura ao longo do túnel, variável de 0,5 para alta cobertura (acima de 3 diâmetros) até 0,7 para baixa cobertura (menos de 3 diâmetros);

r = grau de risco de acidentes com terceiros induzido pela escavação, variável de 1,0 para baixo risco até 2,0 para alto risco.

b) O comprimento total das sondagens deve estar entre 1,5 a 2 vezes o comprimento total do túnel.

c) O custo total das sondagens deve estar compreendido entre 1 e 3% do orçamento destinado à construção do túnel.

d) O *United States National Committee on Tunnelling Technology* – USNC/TT – estabelece um comprimento total de sondagens mínimo equivalente a 1,5 vezes o comprimento do túnel.

3.2.7 Fatores Condicionantes

Os fatores condicionantes que possam trazer riscos ao túnel e que requeiram atenção especial de monitoramento durante a construção devem ser devidamente indicados nos desenhos de projeto, assim como as instruções de análise e as ações de contingência. Em caso da não

identificação desses fatores condicionantes durante as prospecções, deve-se deixar explícita a sua não constatação.

3.3 PROJETO DO TÚNEL

Verificar se o projeto do túnel apresenta a definição dos seguintes itens:

- método construtivo de escavação;
- seções transversais;
- ações sobre os suportes;
- dimensionamento dos suportes;
- planos de instrumentação;
- questão sobre o aproveitamento e/ou destinação adequada do material escavado;
- serviços técnicos auxiliares, como controle da água.

Tais itens serão abordados com mais detalhe a seguir.

3.3.1 Método construtivo de escavação

A partir de variáveis como a geologia, comprimento do túnel, tempo para a conclusão da obra, dentre outras, deve ser definida a metodologia de escavação (normalmente dividida entre convencional ou mecanizada).

A partir das características do maciço e da definição do método construtivo, devem estar bem especificados os seguintes itens: comprimento dos avanços, necessidade de parcialização da escavação e planejamento do sequenciamento (*side drift*, *invert* temporário).

3.3.2 Seções transversais

Deve-se verificar se estão definidos:

- Geometria da frente de escavação (seção em formato de ferradura, retangular, circular, dimensões).

Apesar de ser o elemento central na definição da seção de um túnel, deve considerar não só a seção necessária para o fluxo rodoviário (gabarito dinâmico rodoviário), mas também o espaço necessário para:

- a alocação dos sistemas de ventilação, de iluminação, de sinalização, de instrumentação do túnel, de combate a incêndios, etc.;
- corredores e saídas de emergência (em caso de acidentes); e
- seção adicional (alargada) do túnel para baias de emergência, túneis de ligação.

3.3.3 Ações sobre o suporte

Elencam-se a seguir, numa listagem não exaustiva, ações que provocam esforços sobre o suporte, que devem ser consideradas, a critério do projetista:

a) Ações permanentes:

- empuxo e peso próprio de terras não removíveis;
- empuxos resultantes de ações permanentes aplicadas sobre o solo, como ocupações superficiais, edificações etc.
- peso próprio da estrutura;
- peso próprio de todos os elementos e equipamentos permanentes internos ao túnel, que são geralmente desprezados, a critério do projetista, em função da sua significância;
- empuxos hidrostáticos.

b) Ações variáveis:

- sobrecargas de ocupação superficial variável ao longo da vida útil;
- sobrecargas de trens-tipo rodoviários e ferroviários de superfície;
- sobrecargas de aterros e escavações superficiais, eventualmente assimétricas – potenciais terrenos de empréstimo e bota-fora;
- cargas dos veículos no interior do túnel, que são geralmente desprezados, a critério do projetista; e
- variações na temperatura (dilatação/retração);

c) Ações excepcionais:

A depender da magnitude dos efeitos, do nível de risco, além da avaliação do projetista, devem ser consideradas as seguintes ações excepcionais:

- escavações nas proximidades;
- remoção do terreno de cobertura;
- explosões;
- atividades sísmicas
- gases comprimidos; e
- enchentes.

Deve ser destacada ainda a questão dos incêndios, que, apesar de ser uma ação excepcional, deve ser obrigatoriamente considerada nos cálculos das estruturas do túnel. Assim, atualmente, os túneis rodoviários são projetados levando em consideração os incêndios e seus efeitos.

3.3.4 Métodos de dimensionamento de suportes

Deve ser verificado qual o método de dimensionamento dos suportes escolhido pelo projetista. Para os principais métodos usualmente adotados, listam-se a seguir os requisitos a serem observados:

3.3.4.1 Métodos empíricos

Classificações geomecânicas

Conforme visto na introdução teórica, a partir dos estudos de caracterização geológica, é possível estabelecer a classificação geomecânica do maciço, para o dimensionamento dos suportes e dos revestimentos do túnel. A seguir, são elencadas as tabelas de Bieniawski e de Barton. Evidentemente, os quantitativos de tais tabelas são apenas balizadores. Para os fins do presente trabalho, servem apenas como parâmetro inicial para se averiguar as estimativas das quantidades aproximadas dos principais tipos de suporte.

Tabela 1 – Escavação e suporte para túneis com 10 m de largura; (adaptado de Bieniawski, 1989)

Tipo de Maciço Rochoso	Método de Escavação	Tirantes (diâm. 20 mm, com calda de cimento)	Concreto Projetado	Cambotas Metálicas
I – Rocha Excelente (RMR 100-81)	Face completa – avanço de 3 m	Geralmente, não necessita suporte, exceto tirantes curtos esporádicos		
II – Rocha Boa (RMR 80-61)	Face completa – avanço de 1 a 1,5 m suporte pronto a 20 m da face	Tirantes localizados no teto de 3 m de comprimento e espaçados 2,5 m, malha de aço opcional	Espessura de 5 cm no teto, onde necessitar	Nulo
III – Rocha Média (RMR 60-41)	Frente de escavação em bancadas (berma) 1,5 a 3 m de avanço na calota. Instalação do suporte após cada escavação a fogo Suporte pronto a 10 m da face	Tirantes espaçados 1,5 a 2 m, de 4 m de comprimento, no teto e paredes, com malha de aço no teto	Espessura de 5 a 10 cm no teto e 3 cm nas paredes	Nulo
IV – Maciço Fraturado (RMR 41-21)	Frente de escavação em etapas. Avanço da calota de 1 a 1,5 m. Instalação do suporte paralelo com a escavação, a 10 m da frente.	Tirantes espaçados 1 a 1,5 m, de 4 a 5 m de comprimento, teto e paredes, com malha de aço.	Espessura de 10 a 15 cm no teto e 10 cm nas paredes.	Cambotas metálicas leves a médias, espaçadas de 1,5 m, onde precisar.
V – Maciço muito fraturado (RMR < 20)	Múltiplas frentes. Avanço da calota de 0,5 a 1,5 m. Instalação do suporte paralelo com a escavação. Concreto projetado logo que	Tirantes espaçados 1 a 1,5 m, de 5 a 6 m de comprimento em teto e paredes com malha de aço, atirantado invertido.	Espessura de 15 a 20 cm no teto e 15 cm nas paredes, e 5 cm na face.	Cambotas metálicas médias a pesadas, espaçadas de 0,75 m, com aduelas de aço. Arco invertido.

	possível após a escavação fogo.			
--	---------------------------------	--	--	--

Figura 2 – Seleção dos tipos de suporte para túneis
(adaptado de Barton, 2000)

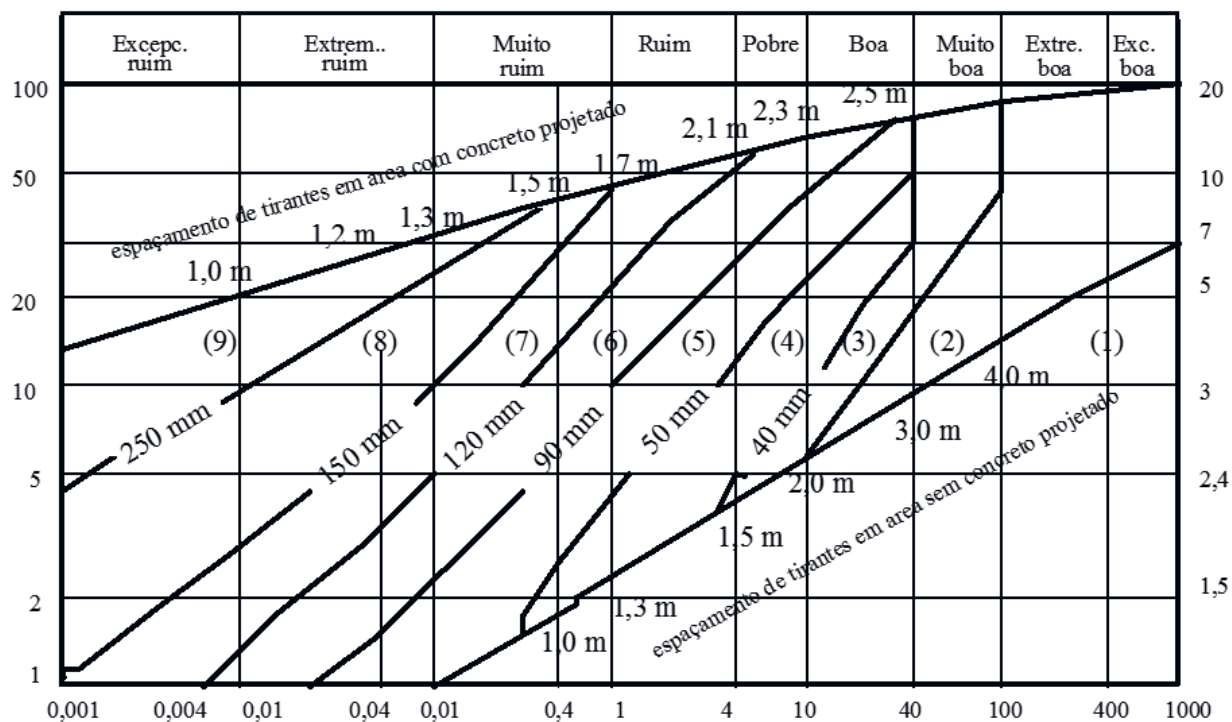


Tabela 2 – Classificação e Suporte para túneis
(adaptado de Barton, 2000)

Classificação	Indicação
(1)	Sem suporte
(2)	Tirantes curtos localizados
(3)	Sistema de tirantes
(4)	Sistema de tirantes com concreto projetado com espessura de 4 a 10 cm
(5)	Concreto projetado reforçado com fibra de aço, com espessura de 5 a 9 cm, além de tirantes

(6)	Concreto projetado reforçado com fibra de aço, com espessura de 9 a 12 cm, além de tirantes
(7)	Concreto projetado reforçado com fibra de aço, com espessura de 12 a 15 cm, além de tirantes
(8)	Concreto projetado reforçado com fibra de aço, com espessura > 15 cm, reforçado com arcos de concreto e tirantes
(9)	Estruturas de concreto

Para a adoção do método empírico, devem ser atendidas as seguintes condições:

- As condições do solo, incluindo as das águas subterrâneas, são comparáveis;
- As dimensões do túnel e sua forma de seção transversal são semelhantes;
- As profundidades das sobrecargas são aproximadamente as mesmas;
- Os métodos de tunelamento a serem empregados são os mesmos; e
- Os resultados de monitoramento *in situ* são comparáveis aos do projeto de tunelamento anterior.

3.3.4.2 Método observacional

Ao aplicar o método observacional, as seguintes condições devem ser atendidas:

- O processo de construção do túnel escolhido deve ser ajustável ao longo do avanço do túnel;
- O proprietário e o contratado devem concordar previamente, em cláusulas contratuais, que permitem modificações no projeto, durante seu avanço;
- As medições de campo devem ser interpretadas com base em um conceito analítico adequado, que relaciona os dados de medição com os critérios de projeto;
- A interpretação de uma determinada seção instrumentada deve ser usada para interpretar outras seções do túnel. Por isso, as experiências estão restritas às seções que são comparáveis em relação às condições do maciço, à cobertura do maciço, etc.; e
- A medição do campo deve ser fornecida em todo o comprimento do túnel, a fim de verificar o comportamento adotado.

3.3.4.3 Recomendações da ITA para o detalhamento estrutural do suporte

Para suportes de concreto, em ITA (1988), são sugeridas as seguintes especificações de projeto estrutural:

(1) A espessura de um suporte secundário de concreto moldado *in loco* pode ter um limite inferior de 20-30 cm para evitar problemas no lançamento do concreto, tais como a subcompactação ou *honeycombing* (irregularidades em excesso) do concreto. São recomendados os seguintes limites inferiores:

- 20 cm, se o suporte não for reforçado;
- 25 cm, se o suporte for reforçado;
- 30 cm para concreto impermeável.

(2) Algum tipo de reforço pode ser recomendável para o controle de fissuras, mesmo quando não for necessário para suportar tensões internas. Deve-se atentar para o fato de que o reforço pode causar problemas no lançamento de concreto ou problemas de durabilidade a longo prazo devido à corrosão do aço. Se o objetivo do reforço com malha de aço no suporte secundário for o controle de fissuras, sugere-se:

- Na superfície exterior, pelo menos $1,5 \text{ cm}^3 / \text{m}$ de aço;
- Na superfície interna, pelo menos $3,0 \text{ cm}^3 / \text{m}$ de aço.

(3) A cobertura mínima recomendada de reforço é:

- 3,0 cm: Na superfície externa se for fornecida uma membrana impermeável;
- 5,0 cm - 6,0 cm: Na superfície externa se estiver diretamente em contato com o solo e as águas subterrâneas;
- 4,0 cm - 5,0 cm: Na superfície interna do túnel;
- 5,0 cm: Para o *invert* e onde a água é agressiva.

(4) Para os suportes segmentados, as especificações (1), (2) e (3) acima não são válidas, especialmente se o anel do túnel segmentado for o suporte primário.

(5) Ao atingir a estanqueidade do concreto, especificações especiais da mistura de concreto, evitando tensões de contração e gradientes de temperatura durante a cura e a qualidade final do concreto são muito mais importantes do que os cálculos teóricos das larguras de fissuras.

(6) Os efeitos de temperatura (tensões) podem ser controlados por juntas de trabalho (até 5m nos portais) e por reforço adicional em concreto exposto a baixas temperaturas.

(7) Um suporte primário de concreto projetado pode ser considerado como auxiliar na estabilidade do túnel apenas quando a sua durabilidade a longo prazo é garantida.

Os requisitos para alcançar a durabilidade a longo prazo incluem o bloqueio de água agressiva, a limitação de aditivos de concreto para acelerar a cura e evitar sombras com falhas de concreto projetado atrás das cambotas.

3.3.4.4 Métodos Racionais

O estado da arte da engenharia de túneis preconiza a utilização dos métodos racionais, tais como os descritos na introdução teórica (Modelo de anel e placa, Modelo de anel e mola, Métodos numéricos, etc.). Dessa forma, em que pese a importância dos métodos empíricos, principalmente nas etapas iniciais de um projeto, sempre é recomendada a utilização dos métodos racionais no dimensionamento do túnel.

A partir da utilização dos métodos racionais, é possível utilizar cálculos menos conservadores no dimensionamento, com a manutenção dos mesmos requisitos de segurança, o que propicia um custo menor na construção do túnel.

3.3.5 Qualidade construtiva dos suportes

Verificar se foram apresentadas: as especificações dos materiais (concreto projetado vs concreto moldado), a composição (teor de cimento, aditivos, malha de aço, fibras) e a geometria dos elementos (formato, dimensões).

Também deve constar do projeto básico a metodologia de aplicação (no caso do concreto projetado, via úmida ou a seco).

Verificar se foi analisado o controle das infiltrações no suporte, com a previsão da adequada impermeabilização, necessidade de tratamento dos materiais ferrosos, etc.

3.3.6 Cronograma físico-financeiro

O projeto do túnel deve apresentar cronograma físico-financeiro da obra, com a previsão de custos de todas as etapas do empreendimento e seus respectivos prazos. Desse modo, deve-se:

(1) Avaliar a compatibilidade do prazo previsto para a obra com o porte e o tipo de empreendimento, além da distribuição dos serviços ao longo da duração da obra. O cronograma deve contemplar o valor total da construção, incluído o BDI.

(2) Avaliar a compatibilidade, a fim de evitar a interrupção da obra por falta de recursos orçamentários:

- do cronograma com a dotação orçamentária da obra; e
- da dotação total prevista no PPA com o valor total orçado para o empreendimento.

3.3.7 Monitoramento e instrumentação

Verificar se existe um controle de qualidade efetivo dos materiais a utilizar, antes da instalação na obra.

Na IP-DE-C00/002 (2005) são definidos os seguintes parâmetros para a instrumentação:

- mínimo de três marcos superficiais por seção de instrumentação;
- prever ao menos duas seções mais próximas junto ao emboque do túnel, distantes em torno de 10 m, dependendo da cobertura;
- mínimo de três pinos internos ao túnel, formando um triângulo, com as respectivas leituras de convergência;
- seções de instrumentação internas ao túnel, distantes no máximo a cada 20 m;
- mínimo de um piezômetro ou indicador de nível d'água quando o lençol freático estiver próximo à cota do túnel;

- para instalação de pinos em edificações, considerar o mínimo de três pinos por bloco estrutural, procurando avaliar recalques diferenciais em linha ou em plano.

Na seleção dos métodos e equipamentos a serem aplicados no monitoramento da obra, deve-se aplicar a regra geral de utilização dos meios que forneçam, estritamente, os dados realmente úteis para as análises pretendidas. Além disso, deve-se optar pelas técnicas mais simples e robustas entre as que satisfaçam essa exigência.

A opção pelas metodologias a seguir deve ser realizada em fase de projeto, podendo ser modificada por solicitação do empreiteiro, e adaptada (pelo Projetista e Fiscalização) em fase de obra, no que se refere às técnicas e parâmetros a serem obtidos.

Natureza, tipo e localização da obra: a natureza da obra influencia o tipo e robustez dos equipamentos, que poderão ter de operar à distância e por longos períodos; o tipo

Características geotécnicas: a litologia, a hidrogeologia, o grau de alteração, os acidentes tectônicos, a fraturamento, entre outros, condicionam a malha de observação, o tipo de instrumentação e a frequência de leituras.

Verificar se o projeto de monitoramento e instrumentação engloba minimamente os seguintes aspectos:

- (1) Controle das deformações do túnel, incluindo a manutenção do perfil do túnel aberto. O histórico do desenvolvimento de deslocamentos e convergências pode ser considerado um critério de segurança, embora as medições de campo não produzam as margens que a estrutura pode suportar antes de falhar.
- (2) Verificação da adequabilidade do método de escavação selecionado.
- (3) Controle dos recalques na superfície, além da obtenção de informações sobre o padrão de deformação no maciço e sobre a parcela dos recalques causada pela redução do nível da água.
- (4) Medição do desenvolvimento de tensões nos elementos estruturais, indicando resistência suficiente ou a possibilidade de falha.
- (5) Indicação de deformações progressivas, que requerem ação imediata para o fortalecimento do maciço e/ou do suporte.

(6) Fornecimento e armazenamento de provas (dados do monitoramento) para eventuais reivindicações de seguro, como por exemplo, fornecimento de resultados de nível dos recalques na superfície em áreas urbanas.

3.3.8 Estudos hidrogeológicos

Verificar se no projeto básico são apresentados os estudos de Hidrogeologia: As prospecções devem identificar todos os tipos de eventos hidrogeológicos que possam causar interferências na obra, tais como: poços, vertentes, cursos d'água, aquíferos etc. Para tais eventos, devem ser apresentadas as caracterizações quanto a: nível de água, variação dos níveis entre o período chuvoso e o de seca, pressões hidrostáticas.

4 CONCLUSÃO

Foram revisados os principais aspectos teóricos relacionados a um projeto de construção de túnel. A revisão teórica permitiu sedimentar os conhecimentos acerca do tema, com o objetivo viabilizar a elaboração das diretrizes para auditoria em projetos de obras de construção de túneis rodoviários.

Os estudos feitos nas publicações da Associação Internacional de Túneis, especialmente no documento “Diretrizes para Projeto de Túneis”, permitiram ter uma perspectiva mais ampla de como se dá a elaboração do projeto em diversos países. Ademais, foram consultadas outras referências bibliográficas quando se julgou necessário aprofundar algum aspecto teórico.

Na segunda parte do Trabalho de Conclusão de Curso, foram apresentadas as diretrizes para auditoria em projetos de obras de construção de túneis rodoviários. Com o estabelecimento das diretrizes, julga-se ter contribuído para tornar mais simplificada e estruturada a auditoria de projeto de construção de túneis rodoviários.

Como proposta de trabalhos futuros, pode-se sugerir a elaboração de diretrizes para a auditoria de um projeto de túneis a partir da parte estrutural concluída. Isto é, uma análise dos projetos de construção de túneis relacionada especificamente aos temas de sinalização, ventilação, iluminação e instrumentação.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1983). NBR 8044 – Projeto Geotécnico. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.

BARTON, N. (2000). TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 172 p.

BASTOS, M. J. N. (1998). A Geotecnia na concepção, projeto e execução de túneis em maciços rochosos. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa 166 p.

BIENIAWSKI, Z.T. (1984). Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 272 p.

DER/SP. IP-DE-C00/002 DER/SP (2005) – Instrução de Projeto do Departamento de Estradas de Rodagens do Estado de São Paulo

ESTEIO (2017). Sítio eletrônico: www.esteio.com.br. Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A., Curitiba, PR (acessado em outubro de 2017).

FRANCISS, F.O. (1989) Túneis em Rochas Brandas. Interciência, Rio de Janeiro.

GALERA FERNÁNDEZ, J. M. (1997). “*Caracterización Geotécnica de Macizos Rocosos*”. Manual de túneles y obras subterráneas. Ed. C. López Jimeno. Entorno Grafico, S. L. Madrid. pp. 143-181.

ITA (1988). Guidelines for the Design of Tunnels. International Tunnelling and Underground Space Association. ITA Working Group No. 7. 13 p.

ITA (2015). Strategy for Site Investigation of Tunnelling Projects. International Tunnelling and Underground Space Association. ITA Working Group No. 2. 32 p.

TCU (2012). Roteiro de Auditoria de Obras Públicas do TCU, aprovado pela Portaria Segecex n. 33, de 7/12/2012.

SOUZA, J.C.T. (2012). Propostas de Diretrizes Gerais para Projeto de Túneis Rodoviários. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-203/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 225 p.